



AIPO

Agenzia Interregionale per il fiume Po



COMUNE DI STAGNO LOMBARDO
Provincia di Cremona

SETTORE POLITICHE ENERGETICHE PATRIMONIO AMBIENTE SERVIZI LAVORI PUBBLICI

Commessa:

CR-E-815 Rifacimento chiavica del Fossadone sull'Argine Maestro sinistro del fiume Po in Comune di Stagno Lombardo (CR) - Cod OPERA 936 - CUP B53H19000290002 - CIG 82186558A7

Livello di progettazione

PROGETTO ESECUTIVO

STRALCIO 1



©I.S.I. Ingegneria e Ambiente
Ing. Gian Lorenzo Bernini - Ing. Rosaria Ragazzini
Via Martiri della Liberazione, 36 - 43126 Vicofertile (PR)
cod.fisc. e P.I. 02577010347
Tel. 0521 941229 - info@isiingegneriaeambiente.it

Progettazione

Ing. Gian Lorenzo Bernini
Ing. Rosaria Ragazzini

Titolo

Verifiche di sifonamento e filtrazione

Numero

2020-815-CR-IDRR2

REVISIONE	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
02	28.08.2020	Aut. Paesaggistica	RR	RR	FA
03	23.12.2020	Progetto Definitivo	RR	RR	FA
04	31.03.2021	Progetto Esecutivo	RR	RR	FA
05	25.05.2021	Validazione	RR	RR	FA

Tutti i diritti sono riservati a norma di legge, di questo elaborato è vietata la riproduzione e la cessione a terzi senza esplicita autorizzazione

Sommario

1	PREMESSA	2
2	INQUADRAMENTO TERRITORIALE	2
2.1	Caratteristiche geologiche e geomorfologiche del sito	3
2.2	Caratteristiche idrografiche e aspetti idrologici	4
3	DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI	5
4	ANALISI DI FILTRAZIONE	5
4.1	Modello di filtrazione	6
4.1.1.	Modellazione stratigrafica del terreno	7
4.1.2.	Condizioni al contorno di modellazione	8
4.2	Risultati delle analisi di filtrazione	8
4.2.1.	Rilevato arginale: stato attuale	9
4.2.2.	Rilevato arginale: ringrosso e rialzo di progetto	10
4.2.3.	Nuova Chiavica in c.a. con platea e diaframma	12
4.2.4.	Rilevato arginale in prossimità della nuova chiavica	13
5	CONCLUSIONI	15

Allegati

ALLEGATO IDRR2.1: Profilo geotecnico a supporto delle verifiche di filtrazione

1 PREMESSA

I lavori riguardano la messa in sicurezza della confluenza idraulica del cavo Fossadone a Po mediante rifacimento del sistema di compartimentazione sull'argine Maestro di Po e realizzazione di impianto di sollevamento delle portate del cavo. Il nuovo sistema di regolazione e sollevamento sarà ubicato a monte dell'esistente che verrà mantenuto come ulteriore presidio di sicurezza. Il livello di progettazione Preliminare con relativa valutazione di fattibilità tecnico-economica ha consentito di definire e consolidare gli obiettivi e le soluzioni tecniche da sviluppare nei successivi livelli di progettazione. La presente relazione ha lo scopo di presentare lo studio di filtrazione funzionale al progetto di adeguamento dell'attuale sistema di compartimentazione dell'attraversamento del cavo Fossadone con l'argine maestro e con il nuovo manufatto di regolazione e pompaggio a monte dell'esistente, valutando gli effetti e le possibili interferenze delle opere con la tenuta geotecnica dei rilevati arginali anche in occasione delle sollecitazioni idrauliche più critiche.

Lo studio di filtrazione è stato implementato mediante modellistica numerica agli elementi finiti. Tale analisi consente, infatti, di definire il campo di velocità di filtrazione che s'instaura all'interno dei diversi tratti di rilevato e negli strati sottostanti allo stesso, permettendo di verificare il corretto dimensionamento dei rilevati e dei manufatti tali da prevenire processi che possano potenzialmente condurre all'insorgere di fenomeni di sifonamento.

2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

I lavori in oggetto sono localizzati nell'area sud-occidentale del comune di Stagno Lombardo e, precisamente, sulla chiavica del Fossadone sull'argine maestro di Po.

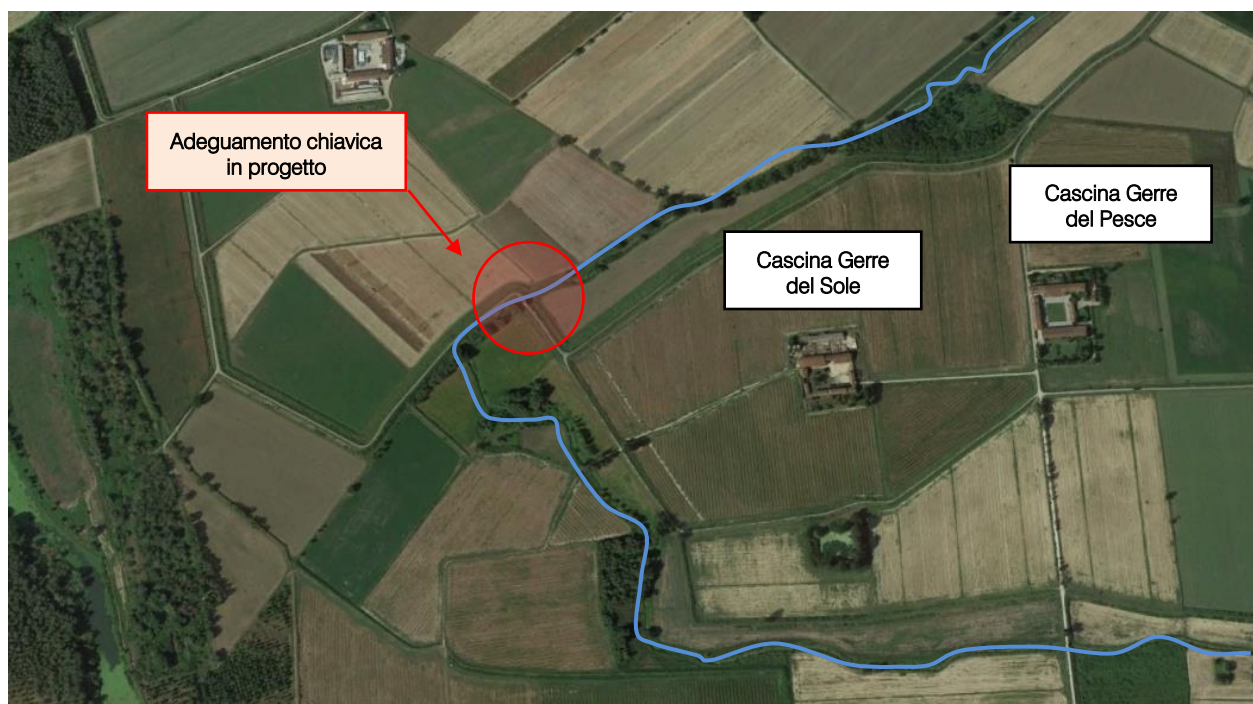


Figura 1: Inquadramento della zona d'intervento.

Il cavo Fossadone raccoglie i contributi di altri corsi d'acqua tra cui alcuni coli (Fregalinetto, Paloschino, Gambarà, Reale, Realino) e altri corsi d'acqua aventi anche funzione irrigua (Palosca, Canziana, Bissolina) oltre gli scarichi di troppo pieno di molte altre rogge che distribuiscono l'acqua per uso irriguo.

L'ultimo tratto del cavo Fossadone scorre prevalentemente sul sedime di vecchi meandri del fiume Po, oggi esterni all'argine maestro e scarica le proprie acque pochi chilometri più a sud, dopo aver oltrepassato il manufatto chiavicale antirigurgito oggetto dell'intervento di adeguamento.



Figura 2: Chiavica esistente del Fossadone.

2.1 Caratteristiche geologiche e geomorfologiche del sito

L'area è localizzabile nella fascia di meandreggiamento olocenica del Po costituita da un sistema di terrazzi alluvionali. Essenzialmente la stratigrafia dedotta dalle indagini in sito è correlabile alla presenza di sedimenti fini prevalentemente concentrati nella parte sommitale con depositi sabbiosi e localmente ghiaiosi sottostanti.

In particolare, i depositi con sabbia grossolana prevalente e livelli ghiaiosi sono correlabili con ambienti di canale fluviale abbandonato; i depositi con sabbia medio-fine prevalente sono stati correlati ad un ambiente deposizionale di argine prossimale mentre i depositi con limo sabbioso prevalente sono correlabili ad un ambiente di argine distale. I depositi con argilla limosa e argilla prevalente sono stati correlati ad un ambiente di piana inondabile. Sono inoltre presenti delle argille con prevalente contenuto organico che sono state associate a un ambiente palustre. Questi depositi hanno uno spessore di circa 1,3-1,8 metri e com'è possibile notare dalle sezioni vanno in eteropia di facies con argille prevalenti di piana inondabile.

Va sottolineato come a circa 14-15 metri di profondità vi sia una base netta di sabbie grossolane, con verso l'alto anche passate di livelli ghiaiosi, probabilmente correlabile con la base di un canale fluviale. Al di sotto sono ancora presenti depositi di argine prossimale e più raramente di argine distale.

Le indagini condotte hanno pertanto permesso di caratterizzare i parametri fisici e geomeccanici dei sedimenti attraversati per permettere un preliminare dimensionamento dell'opera in progetto.

La caratterizzazione e la modellazione geologica e sismica del sito, in base alle relative indagini geologiche e geotecniche svolte, sono esposte nella Relazione Geologica (Elab. 2020-815-CR-GEO1)

2.2 Caratteristiche idrografiche e aspetti idrologici

La situazione è quella tipica dell'Unità idrogeologica del fiume Po in cui si può riconoscere la presenza di un unico acquifero impostato nei depositi sabbiosi che sono disposti in lenti con caratteristiche granulometriche e di contenuto di matrice molto variabile. All'interno dello stesso acquifero si verificano, dunque, significative differenze di permeabilità con conseguenti riflessi sull'idrodinamica. Il limite superiore dell'acquifero è costituito dalla copertura limo-argillosa che aumenta di spessore all'aumentare della distanza dal fiume Po. Il letto dell'acquifero, invece, è posto a profondità di 40 - 50 m dal piano campagna.

Nella fascia di meandreggiamento del Po l'acquifero è di tipo freatico, con sede nei depositi sabbiosi che si estendono pressoché indifferenziati in profondità fino a circa 40 m.

Il fiume Po influenza notevolmente il flusso sotterraneo, infatti, coincide con un asse di drenaggio. La situazione si capovolge in occasione dei periodi di piena, in cui il corso d'acqua ricarica la falda. Il fiume, infatti, costituisce, per il sistema acquifero a esso collegato un limite a potenziale imposto. Il livello idrometrico si deve sempre raccordare alla superficie piezometrica della falda. In sintesi, si possono identificare 2 diverse fasi:

1. Fase di scarico (regime normale): in cui i livelli freatici sono costantemente ad una quota superiore ai livelli idrometrici, per cui si ha un flusso dalla falda al fiume. È la situazione più frequente in quanto coincide con i periodi di abbassamento e di stazionarietà prolungata delle quote idrometriche, durante i quali il corso d'acqua costituisce il livello di base della falda.
2. Fase di ricarica: in cui si assiste all'inversione del flusso idrico che assume direzione dal fiume alla falda. Tale fase si verifica durante l'arrivo dell'onda di piena quando all'innalzamento dei livelli idrometrici corrisponde una variazione più lenta dei livelli freatici, a causa della perdita di carico indotta dalla filtrazione nelle sabbie. Gli incrementi della quota della falda risultano, in funzione della distanza dal corso d'acqua, di ampiezza minore e sfasati nel tempo, rispetto a quelli del fiume.

L'area in oggetto ricade nella zona dei terreni caratterizzati da depositi alluvionali antichi e anche in Area morfologicamente depressa con falda talvolta subaffiorante. L'andamento generale del livello della falda tradizionale evidenzia linee di flusso con direzione prevalente N-S con valori di soggiacenza (4-7 m). È ipotizzabile un innalzamento della falda sino a 1÷2 m circa dal p.c. in periodi di massima ricarica dell'acquifero, in concomitanza di particolari situazioni di piena fluviale eccezionale e di prolungati eventi meteorici.

Il tratto di fiume Po interessato è quello compreso tra la sezione 27 (monte) e 28 (valle) del Catasto delle Arginature Maestre del Fiume Po e i relativi livelli idrometrici sono tratti da "Aggiornamento catasto arginature maestre del fiume Po" dell'Autorità di Bacino del Fiume Po.

In questa fase progettuale, sono stati impiegati i livelli idrometrici della sezione 27B, che sono definiti come segue:

- 38,10 m s.l.m. (Studio SIMPO 82);
- 38,17 m s.l.m. (PAI TR200);
- 36,00 m s.l.m. (Piena ottobre 2000).

Le verifiche di filtrazione sono state realizzate utilizzando il livello della piena con TR200 anni definito nel PAI.

3 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI

Al fine di evitare fenomeni di sormonto o filtrazione arginale sono previsti interventi funzionali alla sicurezza dell'impianto e all'attivazione della capacità di scarico meccanico nel Po delle portate del Fossadone in condizioni di rigurgito.

La tipologia d'intervento è stata individuata in base delle criticità idrauliche e ambientali e mantenendo le caratteristiche costruttive della chiavica esistente.

Le opere strutturali di progetto comprendono la realizzazione di elementi "in alveo", con quote comprese tra fondo Fossadone e piano campagna, ed elementi "fuori alveo" da piano campagna sino a 7.5 m oltre la quota di sommità arginale (pari a 39,20 m s.l.m.)

Il nuovo aggregato strutturale comprende, un "complesso" principale di alloggiamento del sistema di compartimentazione (composto da tre paratoie) e del sistema di sollevamento con funzione anche in impalcato arginale carrabile e da locali "accessori" alla struttura principale.

La nuova struttura chiavica prevede la realizzazione dei seguenti manufatti:

- a) Realizzazione di un nuovo manufatto chiavicale di monte per l'alloggiamento di ulteriori tre paratoie in linea con le esistenti, con movimentazione e regolazione a motore, anche da remoto, così da garantire un doppio scudo di compartimentazione sull'arginatura maestra.
- b) Realizzazione di un impianto di sollevamento delle portate del cavo Fossadone adiacente e collegato all'edificio principale con installazione di una coppia di pompe sommerse (1+1) da 1.0 m³/s alloggiate in apposite camere di aspirazione posizionate in sponda sinistra del cavo Fossadone, e protette da griglie selettive inclinate.
- c) Realizzazione di fabbricato di pertinenza per l'inserimento di un di gruppo elettrogeno di alimentazione del sistema.
- d) Formazione di un rilevato arginale di ringrosso e rialzo dell'esistente, in affiancamento a quest'ultimo, con deviazione della pista di sommità arginale in corrispondenza del nuovo impalcato carrabile di pertinenza della struttura in progetto.

4 ANALISI DI FILTRAZIONE

Come introdotto in premessa, si è proceduto alla verifica dei processi di filtrazione che si instaurano in occasione della piena di riferimento del fiume Po in corrispondenza del nuovo manufatto chiavicale e nel tratto di ringrosso arginale. Ai fini della verifica dell'entità che i processi di piena hanno con il regime di filtrazione e della falda sottostante dell'intervento in progetto, è stato implementato uno studio di filtrazione mediante modellistica numerica. Tale analisi consente, infatti, di definire il campo di velocità di filtrazione che s'instaura all'interno del rilevato arginale e al di sotto della platea di fondazione del manufatto in progetto.

La valutazione oggettiva dell'incremento prestazionale ottenuto sul profilo arginale in funzione della diversa configurazione geometrica e della presenza del nuovo manufatto in conglomerato cementizio armato è stata supportata dalla analisi di filtrazione arginale condotta mediante modellazione matematica a mesh sviluppata attraverso un software agli elementi finiti per l'analisi della filtrazione e delle spinte dovute alle pressioni nei mezzi porosi, sia in condizioni sature che insature, in modalità permanente o variabili nel tempo: in aggiunta alle tradizionali analisi in moto uniforme in campo saturo, le formule che utilizza rendono possibile analizzare la filtrazione come funzione del tempo e studiare problemi come quello

dell'infiltrazione delle precipitazioni, dei processi di riempimento e svuotamento di bacini di invaso o, come nel caso in esame, del transito di un'onda di piena all'interno di un corso d'acqua e delle aree golenali adiacenti.

Dopo aver condotto delle analisi preliminari in regime transitorio, in modo da poter osservare gli incrementi nel tempo delle diverse grandezze caratteristiche del moto di filtrazione e di poter definire il flusso sotterraneo, è stato deciso di continuare le stesse analisi in regime uniforme riportando gli esiti relativi ai valori massimali.

4.1 Modello di filtrazione

Al fine dell'impostazione della modellazione geotecnica in oggetto, è stato fatto riferimento all'insieme di prove geologiche e geotecniche a disposizione, con particolare importanza alle indagini svolte proprio nel corso della presente progettazione e riportate negli specifici elaborati.

Nello specifico, le indicazioni fondamentali sono state ricavate dalle stratigrafie e dai livelli di falda risultanti dalle indagini in situ e dalle caratteristiche geotecniche dei diversi materiali evidenziate dalle prove di laboratorio.

Per effettuare le simulazioni dei processi di filtrazione è stato impiegato un software agli elementi finiti per l'analisi della filtrazione (SEEP/W COD. 9132-224195-248537-3061) e delle spinte dovute alle pressioni nei mezzi porosi, sia in condizioni sature che insature, in modalità permanente o, come nel presente caso, variabili nel tempo: in aggiunta alle tradizionali analisi in moto uniforme in campo saturo le formule che utilizza rendono possibile analizzare la filtrazione come funzione del tempo e studiare problemi come quello dell'infiltrazione delle precipitazioni, dei processi di riempimento e svuotamento di bacini di invaso o, come nel caso in esame, del transito di un'onda di piena all'interno di un corso d'acqua e delle aree golenali adiacenti. Il codice di calcolo è formulato basandosi sulla classica equazione di flusso all'interno di mezzi saturi e insaturi secondo la legge di Darcy, secondo la quale:

$$q = ki$$

dove:

- q è la portata specifica;
- k è la conducibilità idraulica;
- i è il gradiente del carico idraulico totale.

L'equazione differenziale che governa il moto di filtrazione di natura bidimensionale può essere espressa come:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

dove:

- H è il carico idraulico totale;
- k_x è la conducibilità idraulica nella direzione orizzontale;
- k_y è la conducibilità idraulica nella direzione verticale;
- Q è la condizione di flusso al contorno;
- θ è il contenuto volumetrico d'acqua;
- t è il tempo.

4.1.1. Modellazione stratigrafica del terreno

La modellazione delle caratteristiche di permeabilità degli orizzonti stratigrafici del terreno di fondazione è stata definita con stima indiretta dei valori di permeabilità di strato ricavati dalla caratterizzazione litologica condotta sulle prove CTP effettuate lungo l'asse di tracciato arginale, prodotte in allegato alla relazione geologica di progetto e di cui si riporta uno stralcio grafico nella figura seguente. Si allega inoltre alla presente relazione la tavola di inquadramento delle prove condotte con individuazione dei sondaggi considerati per la caratterizzazione stratigrafica (Allegato IDRR2.1).

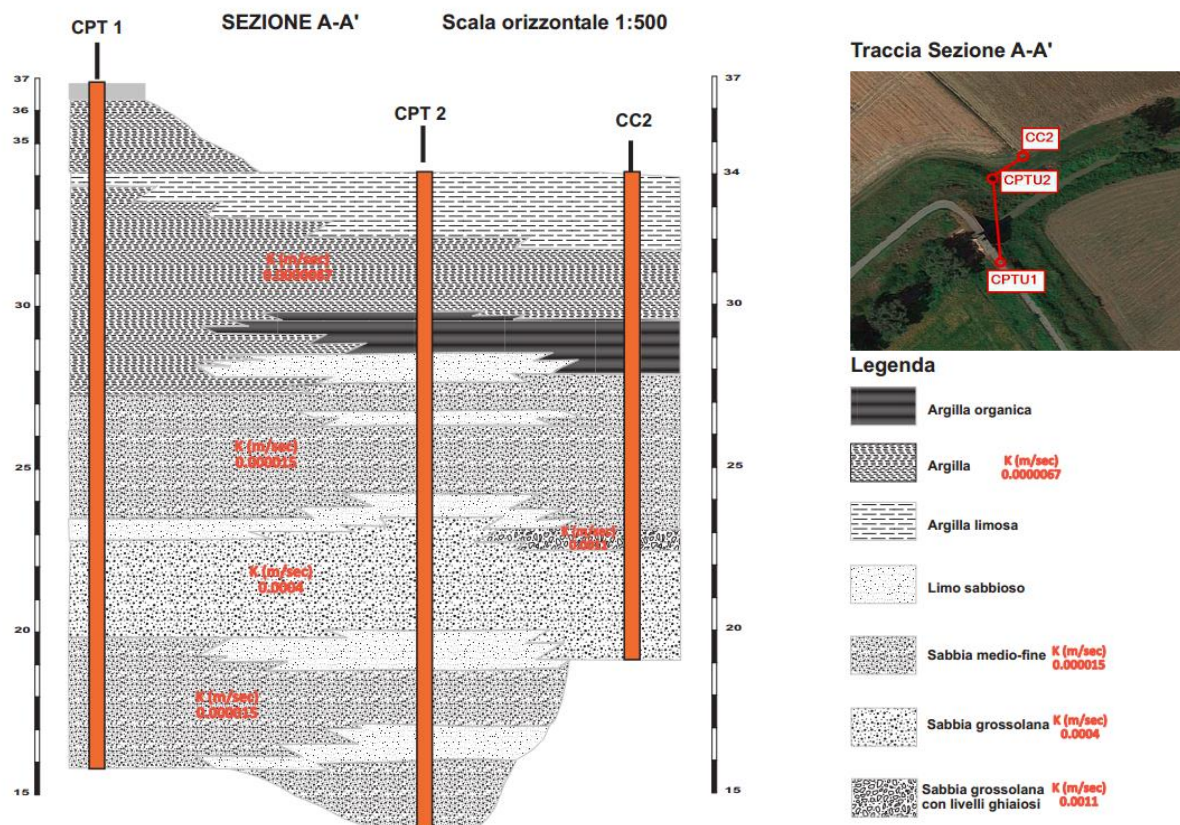


Figura 3: Orizzonti stratigrafici da indagini in sito.

La stratigrafia del terreno in sito è stata modellata e secondo i seguenti orizzonti stratigrafici riportati in tabella:

a.		Argilla limosa	Spessore 550 cm	$k = 6,7 \cdot 10^{-6}$
b.		Sabbia medio-fine	Spessore 600 cm	$k = 1,5 \cdot 10^{-5}$
c.		Sabbia grossolana	Spessore 400 cm	$k = 4,0 \cdot 10^{-4}$
d.		Sabbia medio-fine	Spessore 500 cm	$k = 1,5 \cdot 10^{-5}$
e.		Rilevato arginale	Variabile	$k = 1,0 \cdot 10^{-7}$

I parametri geotecnici e in particolare il coefficiente di permeabilità dei terreni sono definiti attribuendo valori sfavorevoli all'interno del range caratteristico di ogni materiale, attribuendo, cioè, valori di permeabilità elevati al fine di modellare le condizioni più critiche per il rilevato arginale dell'area in esame.

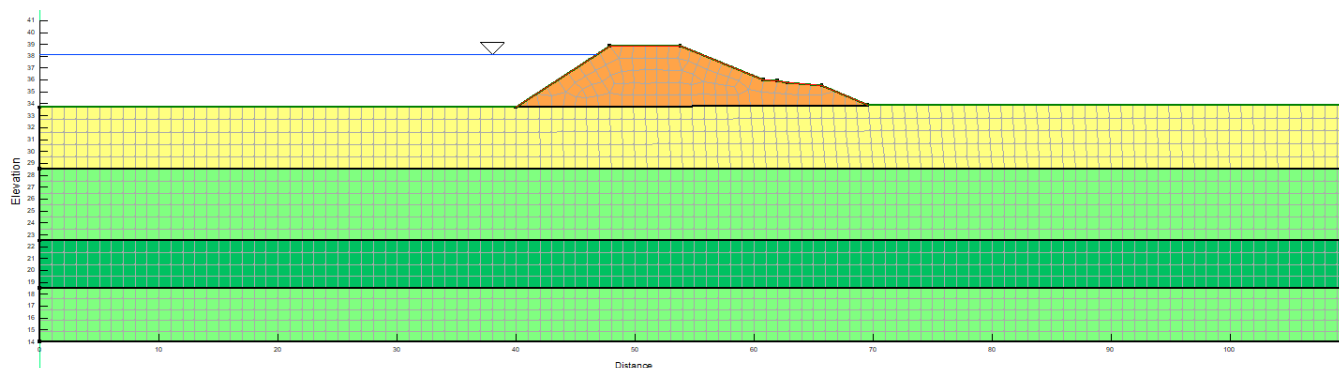


Figura 4: Orizzonti stratigrafici inseriti nel modello come da indagini in sito.

Anche le condizioni iniziali di falda indisturbata, sulla base dei dati disponibili e sopra citati, sono attribuiti in maniera cautelativa, imponendo un livello iniziale pari a circa -8 m dal piano campagna.

4.1.2. Condizioni al contorno di modellazione

Le condizioni al contorno imposte nelle modellazioni di verifica di filtrazione condotte sono:

- Condizione di livello di piena di riferimento del fiume Po alla sezione 27B del Catasto delle Arginature Maestre del Fiume Po con quota idrometrica e carico idrostatico totale pari a 38,17 m s.l.m (4,02 m dal piano campagna) sul piede di valle e sul paramento arginale di valle;
- Condizione di “potential seepage face” sul paramento arginale di monte e sul piano campagna di monte, ovvero condizione di pressione atmosferica confrontata ad ogni iterazione numerica con l’effettivo valore di pressione calcolato durante il processo di filtrazione. Tale condizione è imposta per permettere di determinare e calcolare l’eventuale fuoriuscita superficiale per filtrazione;
- Condizione di quota di falda minima imposta a -8 m dal p.c., come indicato nella Relazione Geologica (Elab. 2020-815-CR-GEO1), e posta a fini cautelativi a circa 50 m a monte del piede di monte;
- Condizione di quota di falda massima imposta a -2,5 m dal p.c., come indicato nella Relazione Geologica (Elab. 2020-815-CR-GEO1), e posta a fini cautelativi a circa 50 m a monte del piede di monte.

4.2 Risultati delle analisi di filtrazione

Nei paragrafi seguenti sono illustrati i risultati delle elaborazioni in occasione della piena di riferimento con TR200 del fiume Po alla sezione 27B nell’ipotesi, in questa fase progettuale, di falda costante. Si riportano in particolare i risultati grafici per le seguenti configurazioni:

1. Rilevato arginale alla sezione più critica (sez.A12): stato attuale
2. Rilevato arginale alla sezione più critica (sez.A12): ringrosso e rialzo di progetto
3. Nuova chiavica in c.a. con platea e diaframma (sez.2)
4. Rilevato arginale in prossimità della nuova chiavica (sez.1)

Si riporta inoltre, per ciascuna configurazione considerata, la verifica a sifonamento secondo il metodo del gradiente critico. Come indicato dalle NTC2018 §6.2.4.2 in condizioni di flusso prevalentemente verticale nel caso di frontiera di

efflusso libera, la verifica a sifonamento si esegue controllando che il gradiente idraulico di efflusso i_E risulti non superiore al gradiente idraulico critico i_c ($\gamma'/\gamma_w \sim 1$) diviso per un coefficiente parziale pari a 2.

Nell'immagine seguente si riporta il posizionamento planimetrico delle sezioni verificate.

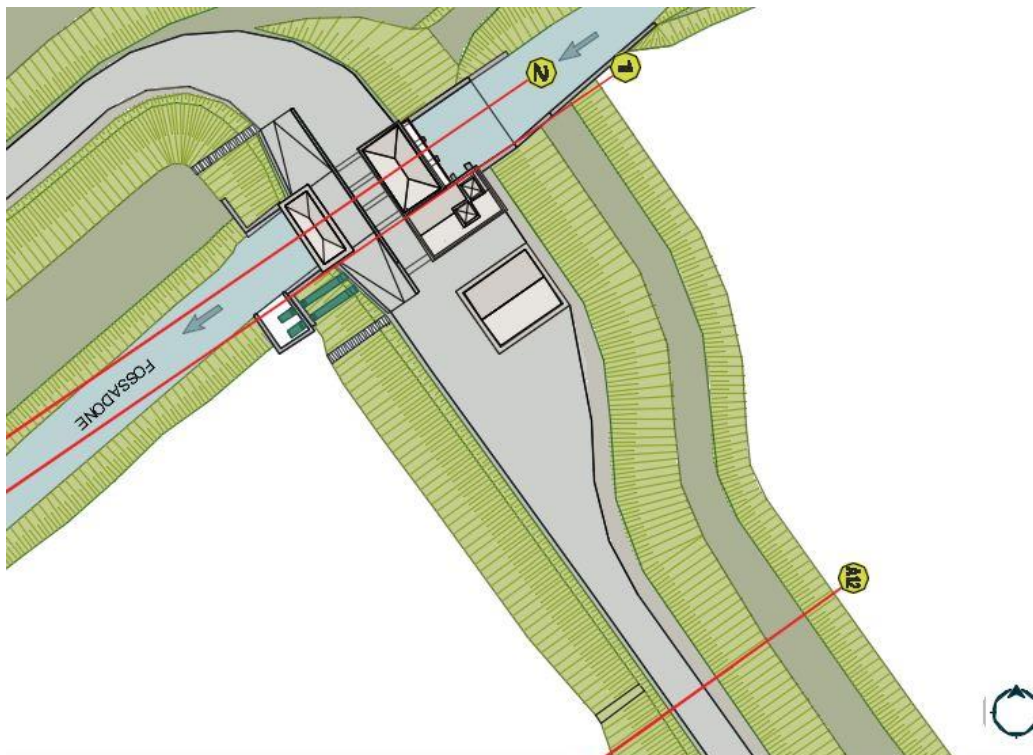


Figura 5: Posizione sezioni di verifica filtrazione.

4.2.1. Rilevato arginale: stato attuale

Nella figura seguente si riporta la schematizzazione stratigrafica e dei dati di input del modello di filtrazione. I parametri geotecnici e in particolare il coefficiente di permeabilità dei terreni sono definiti attribuendo valori sfavorevoli all'interno del range caratteristico di ogni materiale, attribuendo, cioè, valori di permeabilità elevati al fine di modellare le condizioni più critiche per il rilevato arginale dell'area in esame.

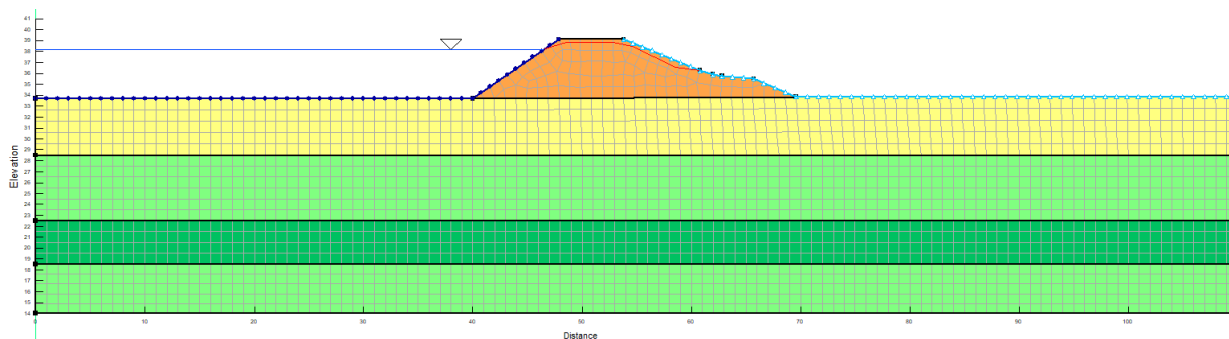


Figura 6: Orizzonti stratigrafici inseriti nel modello come da indagini in sito.

La percezione dell'entità dei fenomeni è resa graficamente nelle immagini seguenti, che fotografano la distribuzione dei carichi totali.

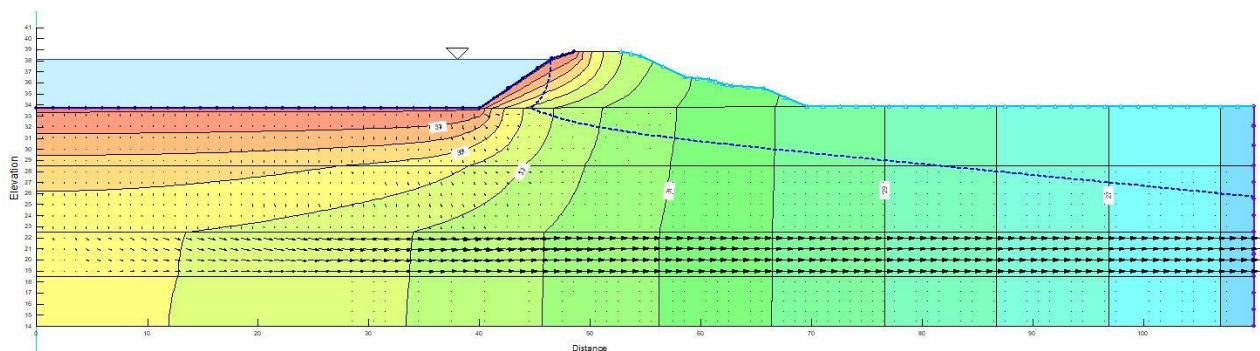


Figura 7: Distribuzione del carico totale con livello di piena TR200 e falda a -8.0 m dal p.c.

Nella figura 7 è riportata la distribuzione dei carichi totali con l'andamento della filtrazione all'interno del rilevato arginale, per la situazione attuale riferita alla **sezione 27B** con coefficiente di permeabilità k medio pari a 10^{-7} m/sec e falda a -8.0 m dal p.c. come da sondaggi.

Dai risultati di analisi è possibile osservare come la linea di filtrazione scenda nel primo tratto pressoché verticalmente non interessando per niente il paramento di valle dell'argine, per poi scendere verso la quota di falda, presente nel secondo strato.

Nel caso in cui la falda fosse più alta (-2.50 m dal p.c.) l'andamento della linea di filtrazione sarebbe il seguente.

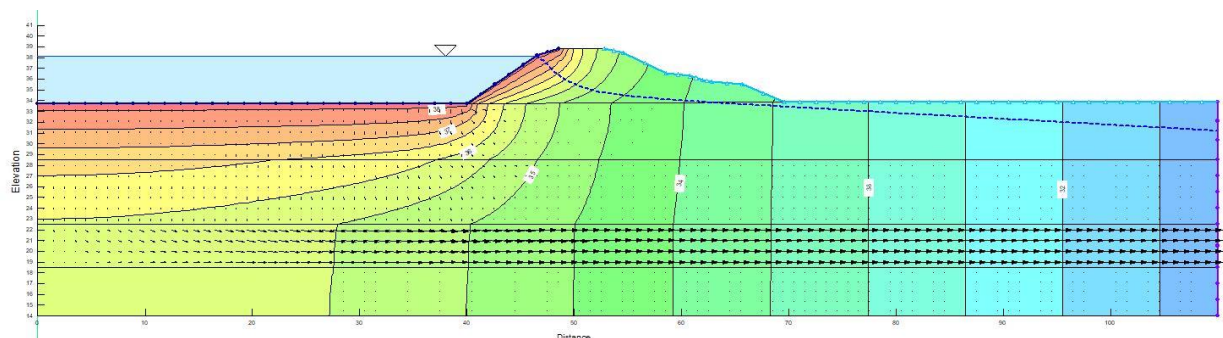


Figura 8: Distribuzione del carico totale con livello di piena TR200 e falda a -2.5 m dal p.c.

Il massimo gradiente idraulico di efflusso alla base dell'argine in direzione verticale risulta pari a $i_E=0,0438$, verificando la condizione a sifonamento secondo il metodo del gradiente critico $i_E < i_c/2$, definendo un $FS=11,41$.

4.2.2. Rilevato arginale: ringrosso e rialzo di progetto

La necessità di realizzare la nuova chiavica con impianto di sollevamento e la messa in sicurezza arginale per piena di Po con TR200 ha portato al ringrosso del rilevato arginale.

Nella figura seguente si riporta la schematizzazione stratigrafica e dei dati di input del modello di filtrazione. I parametri geotecnici e in particolare il coefficiente di permeabilità dei terreni sono definiti attribuendo valori sfavorevoli all'interno del range caratteristico di ogni materiale, attribuendo, cioè, valori di permeabilità elevati al fine di modellare le condizioni più critiche per il rilevato arginale dell'area in esame. La verifica è stata condotta sulla stessa sezione dello stato di fatto considerando un ringrosso del corpo arginale realizzato con apporto di materiale aventi le medesime caratteristiche (coefficiente di permeabilità k medio pari a 10^{-7} m/s) del corpo attuale.

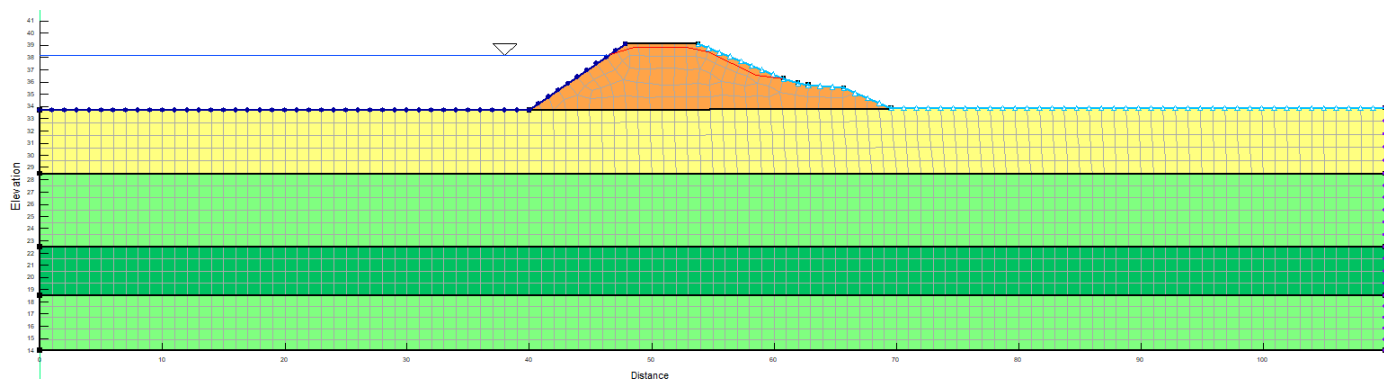


Figura 9: Orizzonti stratigrafici inseriti nel modello come da indagini in sito.

Dall'elaborazione grafica dei risultati si evidenzia come la linea di filtrazione continui a non interessare il paramento di valle dell'argine, mantenendo un andamento identico al precedente e dimostrando che il ringrosso e il rialzo sono necessari per l'adeguamento in quota per piena con TR200 e per la continuità di percorribilità della sommità arginale.

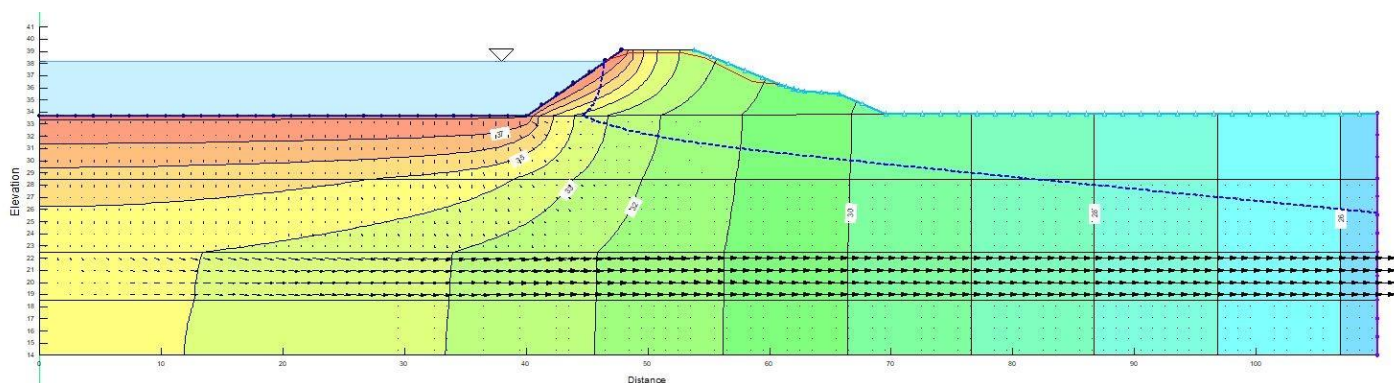


Figura 10: Distribuzione del carico totale con livello di piena TR200 e falda a -8.0 m dal p.c.

L'intervento di rialzo e ringrosso non sarebbe quindi necessario ai fini del miglioramento delle prestazioni di tenuta idraulica del corpo arginale.

Nel caso in cui la falda fosse più alta (-2.50 m dal p.c.) l'andamento della linea di filtrazione sarebbe il seguente.

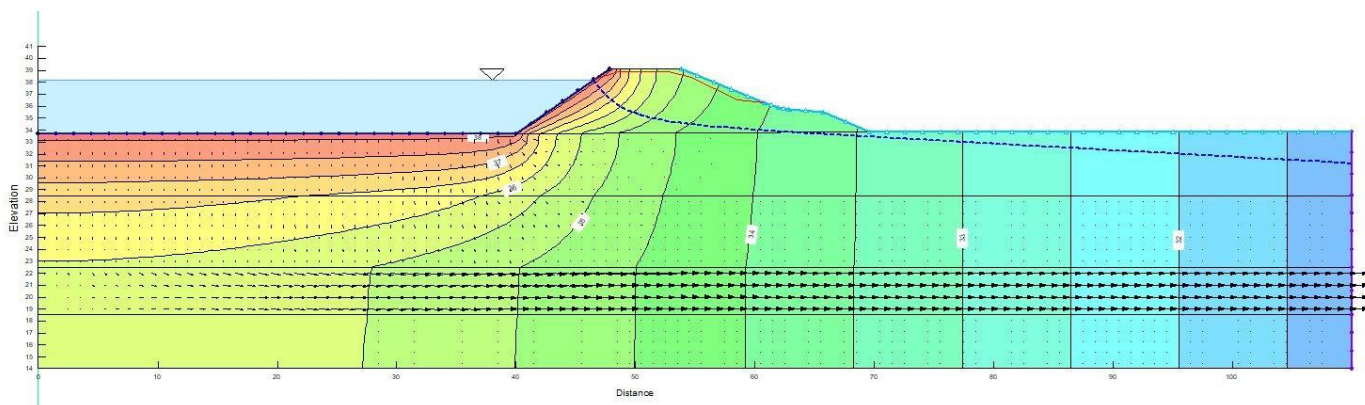


Figura 11: Distribuzione del carico totale con livello di piena TR200 e falda a -2.5 m dal p.c.

Il massimo gradiente idraulico di efflusso alla base dell'argine in direzione verticale risulta pari a $i_E=0,0438$, verificando la condizione a sifonamento secondo il metodo del gradiente critico $i_E < i_C/2$, definendo un $FS=11,41$.

4.2.3. Nuova Chiavica in c.a. con platea e diaframma

La presenza di terreni soggetti a liquefazione, nel secondo orizzontamento stratigrafico, ha imposto la realizzazione di fondazione profonde su diaframmi strutturali caratterizzati da una quota di imposta tale da superare gli strati affetti da suscettibilità alla liquefazione e garantire un adeguato ammorsamento negli strati stabili. La diaframmatrice risulta infine utile a garantire un incremento dei percorsi di filtrazione ed evitare il sifonamento dello sbarramento, come dimostrato dalle simulazioni prodotte nell'ambito delle verifiche di valutazioni preliminari di fattibilità tecnico-economica del progetto. Il modello di filtrazione condotto sulla sezione "2" in asse Fossadone è stata sviluppata:

- ⇒ Considerando, a favore di sicurezza, il solo manufatto di progetto, come se il manufatto esistente posto a valle fosse stato demolito;
- ⇒ Una quota di fondo della nuova infrastruttura idraulica pari a 31.20 m s.l.m., ossia pari alla quota assoluta di estradosso della platea di fondazione della struttura in progetto;
- ⇒ La presenza di una diaframmatrice trasversale caratterizzata da una quota di fondo pari a +20 m s.l.m., spessore 60 cm,

La condizione al contorno analizzata è la più gravosa idraulicamente, ovvero quella con paratoie chiuse, livello di Po TR200 e cavo Fossadone vuoto.

I parametri geotecnici e in particolare il coefficiente di permeabilità dei terreni sono definiti attribuendo valori sfavorevoli all'interno del range caratteristico di ogni materiale, attribuendo, cioè, valori di permeabilità elevati al fine di modellare le condizioni più critiche.

Nella figura seguente si riporta la schematizzazione stratigrafica e dei dati di input del modello di filtrazione.

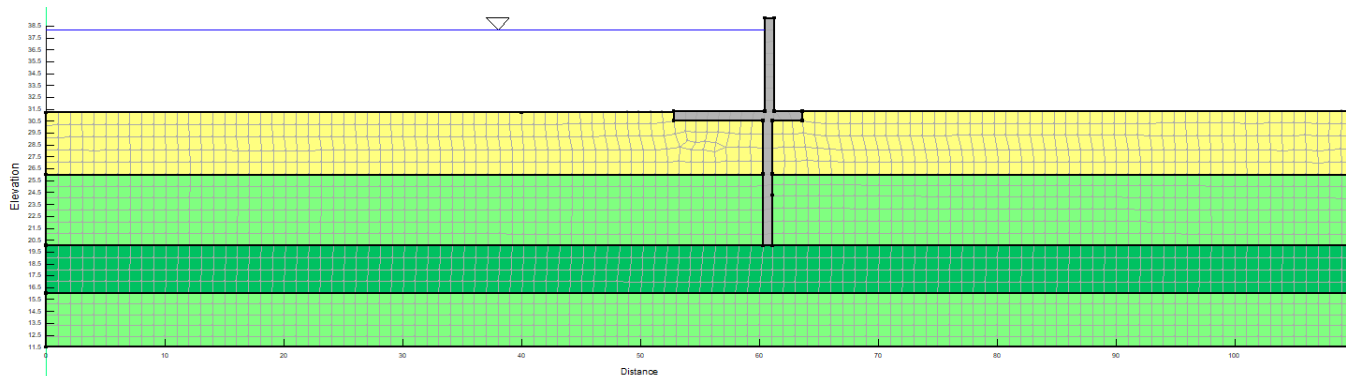


Figura 12: Orizzonti stratigrafici inseriti nel modello come da indagini in sito.

Nella figura seguente si riporta l'andamento dei carichi totali per le condizioni al contorno imposte durante la verifica di filtrazione. Vengono inoltre evidenziate le linee di flusso, le quali dimostrano che le caratteristiche dimensionali del diaframma sono adeguate ad evitare fenomeni di sifonamento.

Le linee di flusso, sia con falda a -8.0 m dal p.c. che a -2.5 m dal p.c., girano attorno alla parete del diaframma per poi tornare verso la quota di falda presente nel secondo strato.

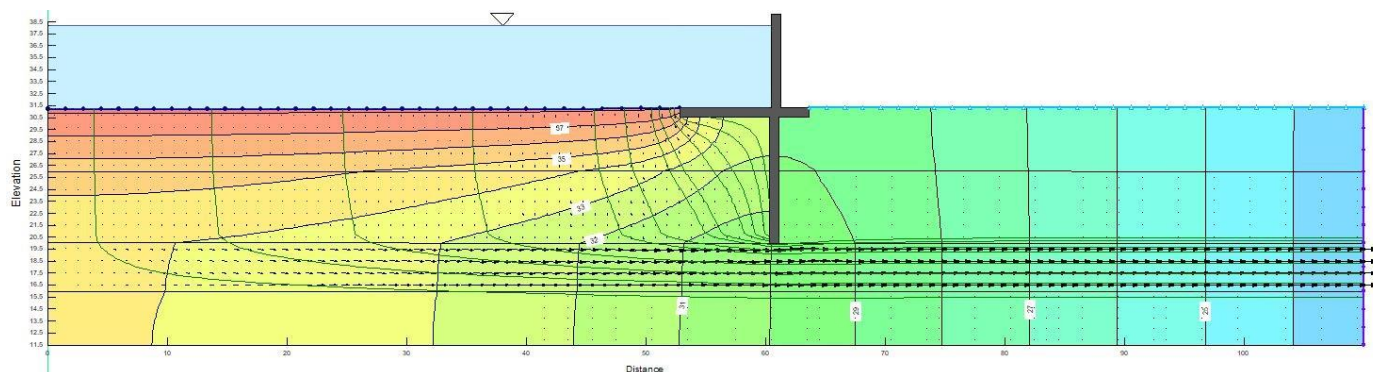


Figura 13: Distribuzione del carico totale con livello di piena TR200 e falda a -8.0 m dal p.c.

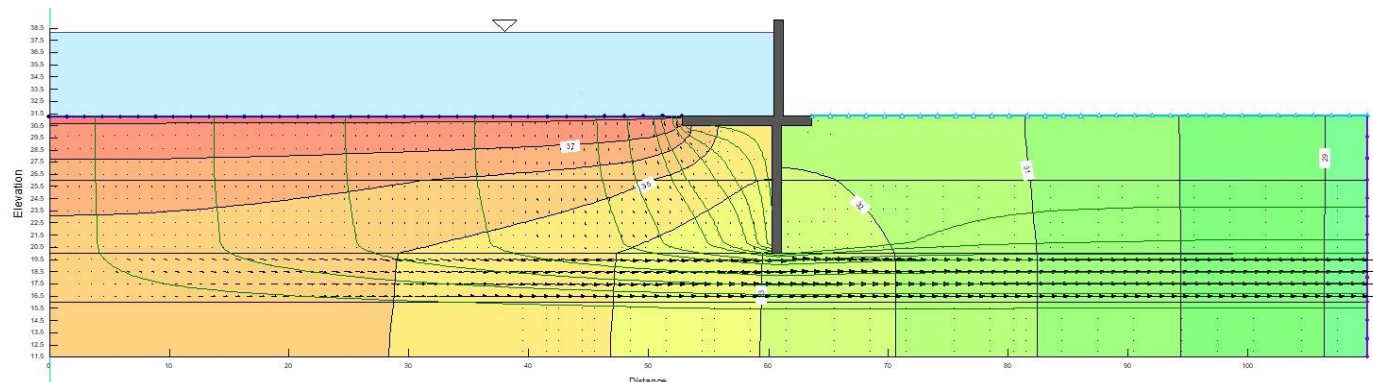


Figura 14: Distribuzione del carico totale con livello di piena TR200 e falda a -2.5 m dal p.c.

Il massimo gradiente idraulico di efflusso a valle del diaframma in direzione verticale risulta pari a $i_E = 0,0291$, verificando la condizione a sifonamento secondo il metodo del gradiente critico $i_E < i_C/2$, definendo un $FS = 17,18$.

4.2.4. Rilevato arginale in prossimità della nuova chiavica

La necessità di realizzare la nuova chiavica con impianto di sollevamento e la messa in sicurezza arginale per piena di Po con TR200 ha portato al ringrosso del rilevato arginale. L'entità del ringrosso, funzionale al raccordo con le nuove strutture, è tale da garantire un sufficiente ricoprimento ai percorsi di filtrazione indotti dal gradiente idraulico.

Tale evidenza, dimostrata dalle modellazioni di verifica a sifonamento condotte sulla sezione "1" di sponda adiacente il manufatto di regolazione (si veda figura 5), ha escluso la necessità di realizzazione di diaframature di tenuta idraulica ad immersione del nuovo manufatto di regolazione con l'adiacente rilevato arginale.

Nella figura seguente si riporta la schematizzazione stratigrafica e dei dati di input del modello di filtrazione.

I parametri geotecnici e in particolare il coefficiente di permeabilità dei terreni sono definiti assegnando valori sfavorevoli all'interno del range caratteristico di ogni materiale, attribuendo, cioè, valori di permeabilità elevati al fine di modellare le condizioni più critiche per il rilevato arginale dell'area in esame.

Tale verifica viene condotta in particolare per assicurare che il nuovo manufatto non sia tale da attivare fenomeni di aggiramento dei percorsi di filtrazione nel corpo arginale di sponda in prossimità della chiavica.

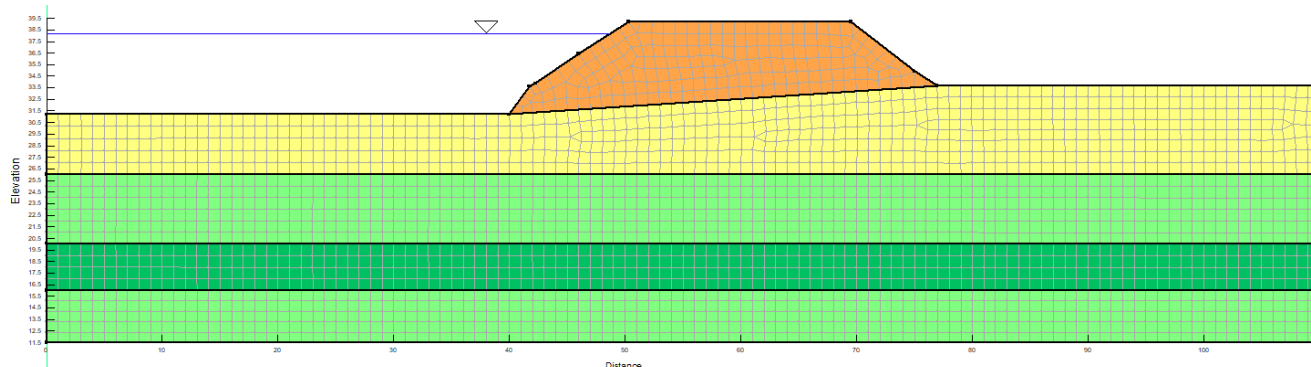


Figura 15: Orizzonti stratigrafici inseriti nel modello come da indagini in sito.

La verifica è stata condotta sulla sezione immediatamente prossima al nuovo manufatto di progetto, considerando il ringrosso del corpo arginale realizzato con apporto di materiale aventi le medesime caratteristiche (coefficiente di permeabilità k medio pari a 10^{-7} m/s) del corpo attuale.

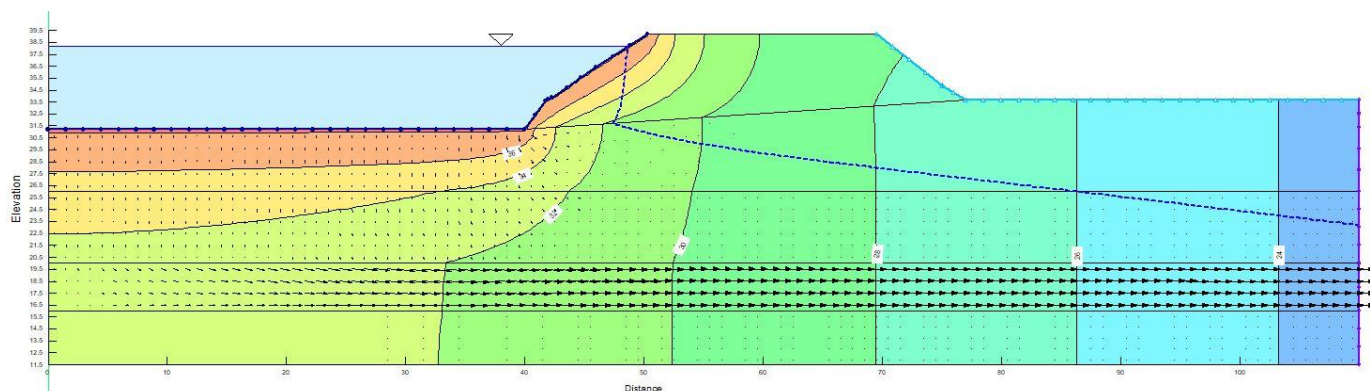


Figura 16: Distribuzione del carico totale con livello di piena TR200 e falda a -8.0 m dal p.c.

Dall'elaborazione grafica dei risultati, prodotta in figura, si evidenzia come la linea di filtrazione non interessi il paramento di valle dell'argine, dimostrando che l'argine di progetto in prossimità della nuova chiavica non presenta criticità di filtrazione per aggiramento di quest'ultima, nemmeno per piena con TR200.

Nel caso in cui la falda fosse più alta (-2.50 m dal p.c.) l'andamento della linea di filtrazione sarebbe il seguente.

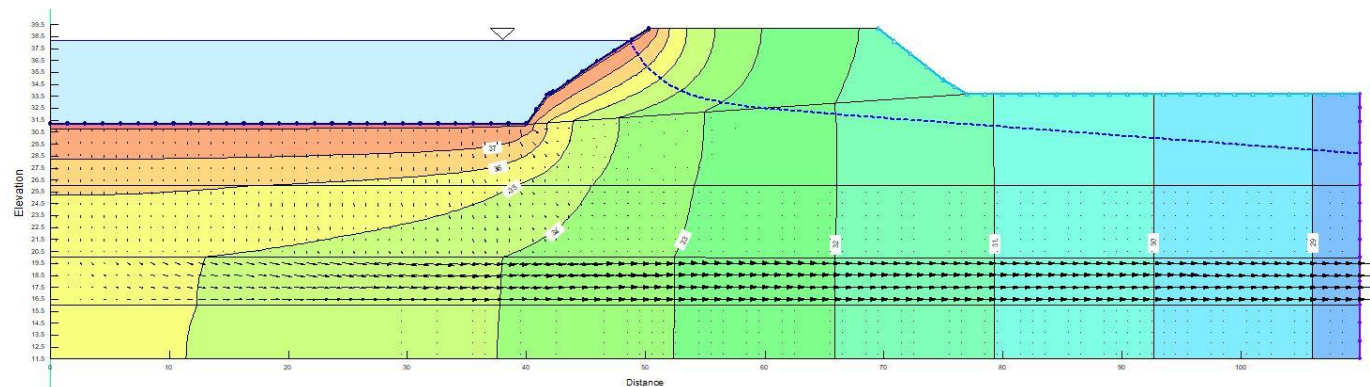


Figura 17: Distribuzione del carico totale con livello di piena TR200 e falda a -2.5 m dal p.c.

Il massimo gradiente idraulico di efflusso alla base dell'argine in direzione verticale risulta pari a $i_E=0,0758$, verificando la condizione a sifonamento secondo il metodo del gradiente critico $i_E < i_c/2$, definendo un $FS=6,59$.

5 CONCLUSIONI

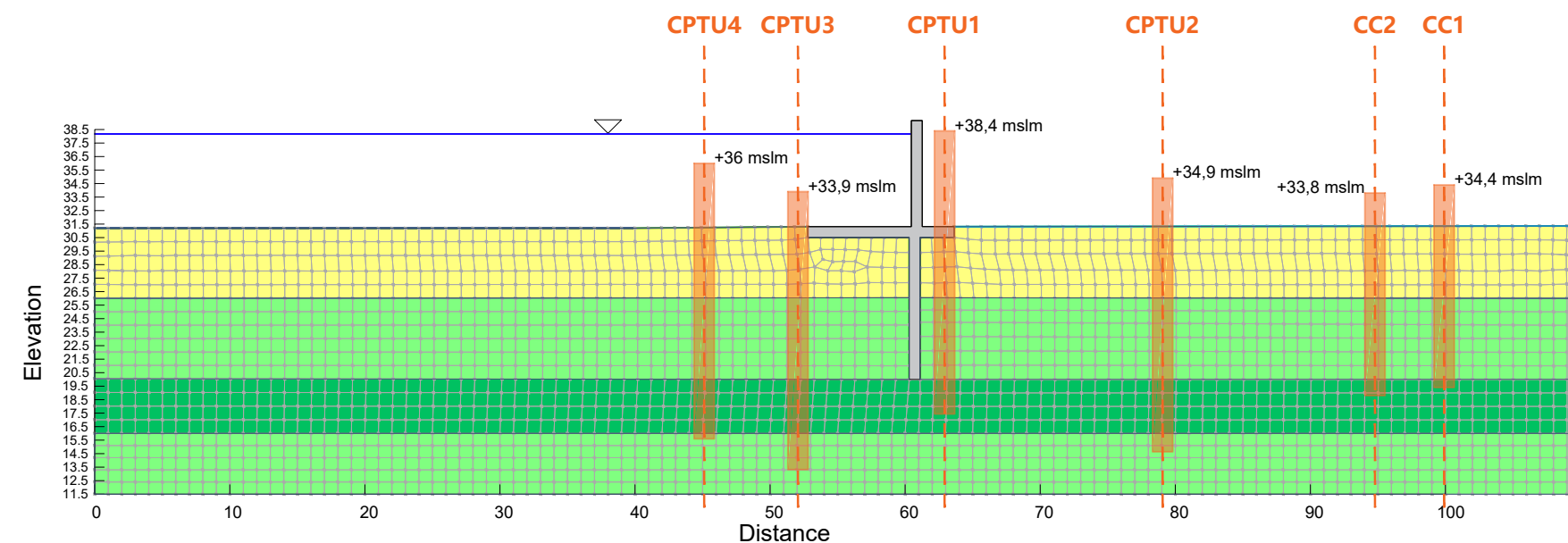
L'adeguamento e il potenziamento delle opere di presidio idraulico previste è accompagnato dalla realizzazione di apposite diaframature in corrispondenza dei muri di sponda e della platea di fondazione che oltre alla funzione statica di ammortamento delle strutture entro strati profondi non soggetti a fenomeni di liquefazione, consentono il contenimento dei processi di filtrazione in corrispondenza e prossimità dei rilevati arginali e del manufatto stesso, al fine di scongiurare l'insorgere di potenziali fenomeni di sifonamento in condizioni particolarmente gravose.

Nelle condizioni di progetto, infatti, il paramento lato fiume Po della chiavica e dei rilevati arginali sono interessati dal transito dell'onda di piena con TR 200 anni.

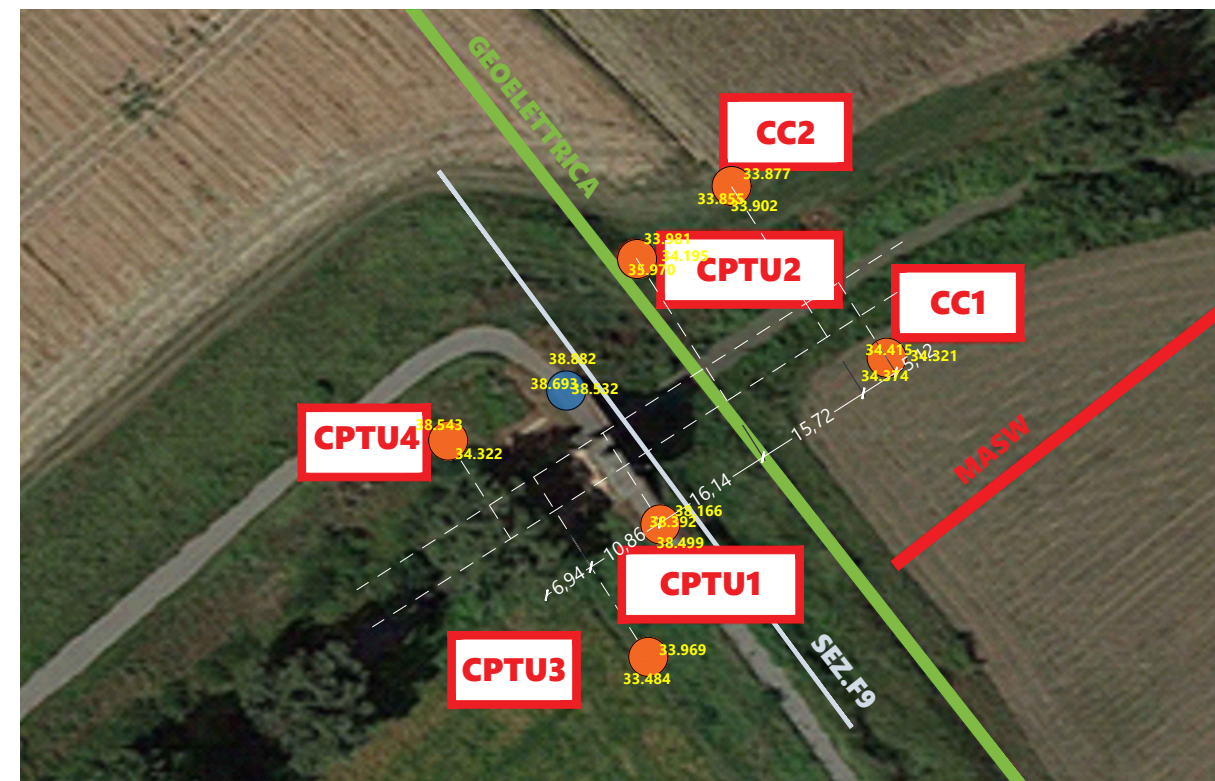
In aggiunta alle opportune difese idrauliche progettate per la difesa dal flusso idrico superficiale, è stata quindi valutata la necessità di contenere anche il flusso sub superficiale mediante opportune opere.

Sulla base delle analisi idrodinamiche e di filtrazione illustrate nel presente studio, si dimostra il corretto dimensionamento delle scelte progettuali, anche in condizioni particolarmente sfavorevoli e per tempi di ritorno di 200 anni.

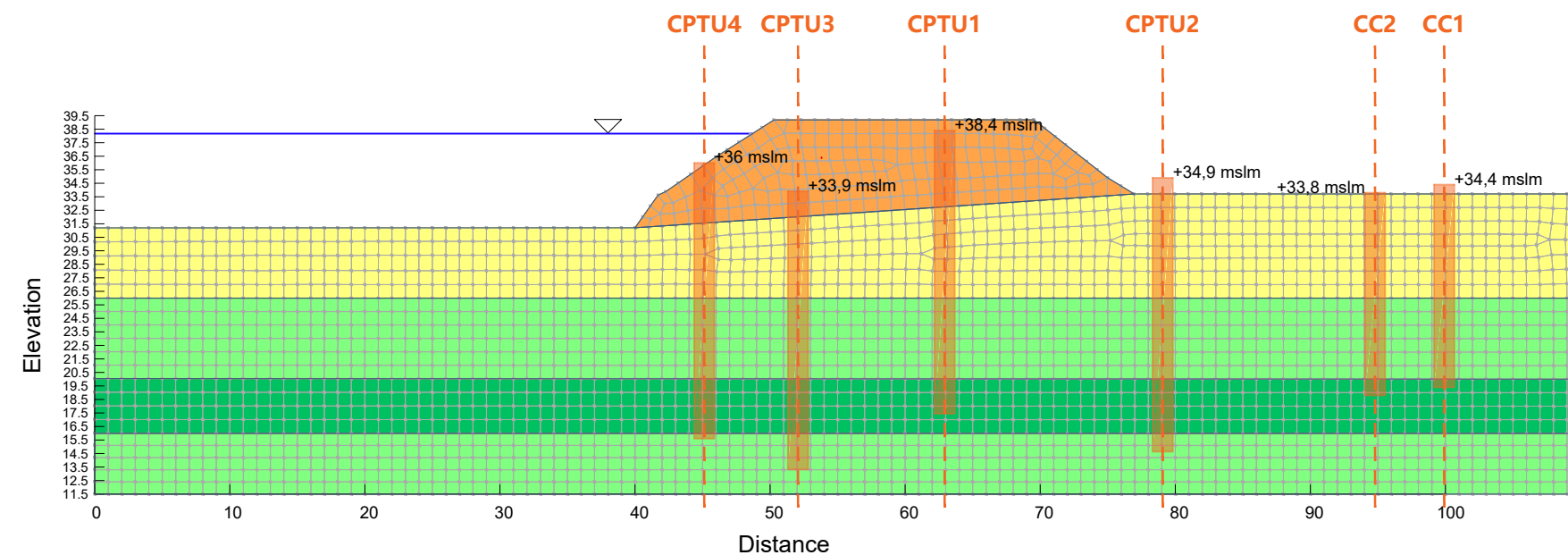
Modellazione stratigrafica della verifica di filtrazione sul diaframma



PLANIMETRIA GENERALE CON UBICAZIONE DEI SONDAGGI



Modellazione stratigrafica della verifica di filtrazione sul corpo arginale adiacente la struttura



STRATIGRAFIA DA PROVE GEOELETTRICHE

